

INFLUÊNCIA DA CORROSÃO NO COMPORTAMENTO AO ARRANCAMENTO DE FIBRAS DE AÇO NO BETÃO AUTO-COMPACTÁVEL

C. FRAZÃO

Investigadora Eng.^a Civil
ISISE/UMINHO
Guimarães; Portugal
frazao_cristina@hotmail.com

J. BARROS

Prof. Catedrático Eng.^a Civil
ISISE/UMINHO
Guimarães; Portugal
barros@civil.uminho.pt

A. CAMÕES

Prof. Auxiliar Eng.^a Civil
CTAC/UMINHO
Guimarães; Portugal
aires@civil.uminho.pt

A. C. ALVES

Investigadora
CMEMS/UMINHO
Guimarães; Portugal
alexandra@dem.uminho.pt

L. ROCHA

Prof. Assistente Física
UNESP – Univ. Estadual Paulista
Bauru/São Paulo; Brasil
lrocha@fc.unesp.br

RESUMO

Quando adicionadas ao betão, a possibilidade de corrosão das fibras de aço, devido à penetração de cloretos e ação da carbonatação, é um parâmetro de durabilidade no betão auto-compactável reforçado com fibras de aço (BACRFA) que requer especial atenção. No BACRFA fendilhado, a corrosão tende a ocorrer nas fibras de aço que atravessam as fissuras, o que pode afetar o seu comportamento à flexão. Deste modo, o estudo do comportamento interfacial fibra/matriz é importante para a compreensão dos efeitos da corrosão das fibras de aço no comportamento mecânico e na durabilidade das estruturas de BACRFA. Com o intuito de avaliar estes efeitos, no presente trabalho desenvolveu-se um ensaio experimental de arrancamento de fibras de aço em BAC fendilhado, sujeitas previamente à ação da corrosão por exposição a um ambiente agressivo de cloretos, sendo a corrosão avaliada por intermédio de técnicas eletroquímicas. Os ensaios eletroquímicos realizados revelaram que a probabilidade de corrosão das fibras de aço num ambiente com cloretos é superior a 90%. No mesmo ambiente, a susceptibilidade para a corrosão das fibras de aço que atravessam uma pseudo-fissura, aumenta com a abertura de fissura provocando um aumento da resistência ao arranque da fibra em BAC fissurado.

1. INTRODUÇÃO

Os processos de corrosão das fibras de aço têm sido objeto de estudo nos últimos anos, sendo opinião geral que a corrosão no betão reforçado com fibras de aço (BRFA) é menos gravosa quando comparada com a corrosão das armaduras ordinárias do betão armado [1]. Este facto verifica-se dado que a diminuição do diâmetro das fibras por corrosão não afeta significativamente a capacidade resistente da interface fibra-matriz e, consequentemente, o comportamento mecânico e a durabilidade das estruturas de BRFA.

A corrosão é uma das manifestações patológicas que mais degrada as estruturas de betão armado, pelo que é de todo o interesse analisar os efeitos deste mecanismo de degradação no betão auto-compactável reforçado com fibras de aço (BACRFA). No betão fendilhado, a corrosão tende a ocorrer nas fibras de aço que atravessam as fissuras, provocando a redução da secção das fibras. Esta redução pode afetar negativamente o comportamento mecânico do BRFA, podendo conduzir a uma redução da resistência residual do BRFA em tração e flexão. Por outro lado, os produtos corrosivos podem causar um aumento do atrito fibra/matriz, melhorando o comportamento de arrancamento da fibra e, consequentemente, a resistência à flexão dos elementos de BRFA [2]. Deste modo, o estudo deste comportamento interfacial fibra/matriz é importante para compreender os efeitos da corrosão das fibras de aço no comportamento mecânico e na durabilidade das estruturas de BACRFA.

Neste contexto, de modo a avaliar a influência da corrosão na relação tensão/deslizamento do arrancamento da fibra do BAC fendilhado, desenvolveu-se um ensaio experimental inovador e não normalizado, para arrancamento de fibras de aço em provetes cilíndricos de BAC fissurados, previamente expostos a ambiente corrosivo. Os principais parâmetros controladores do fenómeno da corrosão são a abertura de fissura e a concentração crítica de cloretos necessária para iniciar a corrosão. Deste modo, ao nível material pretendeu-se investigar a corrosão na fibra para diferentes aberturas de fissura do betão quando sujeita a um ambiente agressivo contendo cloretos. Ao nível estrutural, pretendeu-se avaliar a influência da corrosão na fibra sobre o comportamento mecânico do BACRFA fissurado, recorrendo a um ensaio que permite determinar a relação força de arrancamento versus deslizamento.

A caracterização da corrosão das fibras de aço foi realizada através de técnicas experimentais de monitorização electroquímica e de microscopia eletrónica de varrimento.

2. PROGRAMA EXPERIMENTAL

2.1 Materiais e composição do BAC

No programa experimental realizado foi utilizada uma composição de BAC, constituída por cimento Portland CEM I 42.5R (C), fíler calcário (FC), três tipos de agregados (areia fina 0.15-1.19 mm (AF), meia areia 0.30-4.76 mm (MA) e uma brita 12.5-19 mm (B)), água (A) e superplastificante ViscoCrete 3005 (SP). Na Tabela 1 está apresentada a dosagem de cada componente por m^3 da composição, que foi definida de modo a garantir características de auto-compactabilidade.

Tabela 1 - Composição do BAC (kg/m^3)

C (kg)	FC (kg)	AF (kg)	MA (kg)	B (kg)	A (L)	SP (L)	A/C
413	353	198	722	648	127.8	7.83	0.31

As fibras de aço são de baixo teor de carbono, possuindo extremidades dobradas, com comprimento $l_f = 60mm$, diâmetro $d_f = 0.90mm$, esbelteza $l_f/d_f = 67$ e resistência à tração de 1100 MPa.

Para induzir corrosão nas fibras foi utilizada uma solução aquosa com 3.5% em massa (0.6M) de cloreto de sódio (NaCl).

2.2 Caracterização da corrosão das fibras utilizando técnicas de monitorização eletroquímica

A corrosão de fibras de aço manifesta-se com maior frequência em meio aquoso onde o mecanismo da corrosão é essencialmente eletroquímico. Técnicas eletroquímicas podem ser utilizadas na avaliação, no controlo e na investigação da corrosão de fibras de aço sofrendo ataque corrosivo por iões cloreto [3]. No presente trabalho, a resistência à corrosão de fibras de aço foi avaliada através de alguns parâmetros eletroquímicos, nomeadamente, através da realização de ensaios de potencial em circuito aberto, E_{OCP} (OCP, do Inglês: *Open Circuit Potential*) e de polarização linear [3].

2.2.1 Procedimentos de ensaio

Para realizar os ensaios eletroquímicos, foi utilizada uma célula eletroquímica constituída por um arranjo padrão de três eléctrodos, nomeadamente, o eléctrodo de trabalho, o eléctrodo de referência e o eléctrodo auxiliar. O eléctrodo de trabalho são as fibras de aço, o eléctrodo auxiliar utilizado foi um eléctrodo de platina que possui elevada resistência à corrosão, e todas as medições foram efetuadas tomando como referência o eléctrodo saturado de calomelano (SCE, do Inglês: *Saturated calomel electrode*).

O equipamento utilizado para os ensaios de monitorização eletroquímica foi um Potencióstato/Galvanóstato (Votalab, Radiometer Analytical PGZ100), controlado pelo software VoltaMaster-4 [4].

Antes da realização dos ensaios, a superfície das fibras foi limpa e descontaminada, de modo a que estas ficassem nas mesmas condições iniciais de exposição nos ensaios. Deste modo, as fibras foram lavadas com água destilada e limpas

em propanol por ultra-sons durante 15 minutos. Na superfície da fibra, que não estava em contacto com a solução (metade do comprimento), foi aplicado um impermeabilizante (verniz) de modo a evitar que esta zona da fibra ficasse sujeita a fenómenos de corrosão.

Por cada ensaio eletroquímico realizado foram testadas 4 fibras de aço individualmente nas mesmas condições. Cada fibra foi imersa, em metade do seu comprimento, num recipiente contendo 150 ml de solução de 3.5% NaCl. A concentração de NaCl foi definida de modo a simular as concentrações de cloretos que podem ser encontradas em condições reais de exposição.

O E_{OCP} foi registado durante 60 minutos, logo após a imersão das fibras na solução de NaCl, e durante 30 minutos após os seguintes períodos de imersão: 24 horas, 48 horas, 3 dias, 4 dias e 7 dias. Nos ensaios de polarização linear, após os períodos de imersão das fibras de 60 minutos e 7 dias, registaram-se os valores de E_{OCP} e procedeu-se a um varrimento contínuo e ascendente do potencial com uma amplitude ± 30 mV do valor de E_{OCP} , a uma velocidade de 0.1 mV/s.

2.3 Comportamento ao arrancamento de fibras de aço sujeitas à ação da corrosão

De modo a avaliar os efeitos da corrosão sobre a condição de ligação existente entre a fibra de aço e a matriz cimentícia, desenvolveu-se um ensaio experimental de arrancamento de uma fibra de aço embebida em provete de BAC fissurado, submetido previamente a imersão em solução contendo cloretos. Estes provetes possuíam apenas uma fibra de aço atravessando a superfície de fratura, e foram submetidos a 10 dias de imersão em solução de 3.5% NaCl para induzir a corrosão na fibra por penetração de cloretos e, posteriormente submeter a ensaio de arrancamento.

A influência da abertura de fissura, w , foi estudada através de distintas aberturas nos provetes, nomeadamente, 0.1 mm, 0.3 mm e 0.5 mm. No estudo foram também considerados provetes sem abertura de fissura.

No que diz respeito à espessura de recobrimento da fibra, foi considerada uma distância da fibra à superfície do provete no valor de 10 mm.

Os provetes com abertura de fissura foram submetidos a tensão constante durante todo o período de imersão na solução, de forma a simular com maior realismo as condições julgadas representativas de elemento estrutural de BACRFA fissurado sob carregamento. Os provetes sem abertura de fissura foram imersos sem tensão aplicada, dado que se o BACRFA não tiver fissuras, os mecanismos de reforço das fibras não são mobilizados. Para cada valor de abertura de fissura a estudar foram considerados 3 provetes, ensaiados simultaneamente nas mesmas condições.

Neste ensaio foram também utilizados provetes de referência que não foram sujeitos a imersão em solução de 3.5% NaCl, para servirem de termo de comparação. Estes provetes, com abertura de fissura mínima (aproximadamente 0.1mm), foram mantidos em ambiente de laboratório, não tendo sido submetidos a condições ambientais de aceleração de corrosão.

Finalizado o período de 10 dias de imersão dos provetes, foram realizados os ensaios de arrancamento das fibras, incluindo os provetes livres do fenómeno de corrosão.

Apresenta-se de seguida, resumidamente, as principais fases constituintes do ensaio realizado, que se encontram descritas com mais detalhe em Frazão [5].

2.3.1 Produção dos Provetes

Para este ensaio foram moldados provetes cilíndricos, com dimensões de 88 mm de diâmetro e 160 mm de altura, constituídos por duas partes unidas apenas por uma fibra de aço atravessada. Os provetes foram moldados com BAC, de acordo com a composição indicada na Tabela 1, e as fibras de aço utilizadas foram as indicadas na secção 3.1.

De modo a criar um provete com uma pseudo-fissura, as duas partes constituintes dos provetes foram moldadas em duas fases, cada uma com uma altura de 80 mm moldada com BAC. A fibra foi embebida na parte I do provete moldado na 1ª Fase, em cerca de 1/3 do seu comprimento, e o restante foi embebido na parte II do provete, moldado na 2ª Fase. Antes da moldagem da parte II do provete (na 2ª fase) foi aplicada na face superior da parte I do provete (moldado na 1ª

fase), uma película aderente com 0.2 μm , de modo a impedir a adesão entre as duas partes do provete, e auxiliar na demarcação da superfície para propagação da abertura de fissura, w , atravessada pela fibra.

De modo a monitorizar electroquimicamente a corrosão da fibra no período de imersão do provete, um fio de cobre revestido foi soldado à fibra de aço. Este fio de cobre revestido tem a outra extremidade fora do provete e com comprimento suficiente para ficar fora da solução durante o período de imersão.

2.3.2 Implementação da abertura de fissura, imersão em solução 3.5% NaCl e monitorização electroquímica

As fissuras previstas foram executadas nos provetes após 28 dias de cura e antes destes serem submetidos a imersão em solução de 3.5% NaCl. De modo a executar a abertura de fissura pretendida, com a maior exatidão possível, foi seguido o seguinte procedimento:

i) O provete foi colocado e fixado num suporte simplesmente apoiado. Um pantógrafo foi fixado ao provete, de modo a ampliar (5 vezes) a medição da abertura de fissura ao nível da fibra. Para medir a abertura de fissura registada pelos pantógrafos foram utilizados comparadores mecânicos com leitura de 0.001 mm. As peças metálicas que iriam estar em contacto com a solução foram impermeabilizadas com verniz, de modo a não influenciar o processo de corrosão da fibra (Figura 1).

ii) A execução das fissuras nos provetes foi realizada por intermédio de um sistema de aplicação de carga, após a colocação dos provetes no interior do reservatório onde ficaram imersos. Este sistema de aplicação de carga consiste em adicionar carga à extremidade do sistema de alavanca, até que a força exercida no provete provoque a abertura de fissura pretendida, medida pelo comparador mecânico colocado no pantógrafo (Figura 2). Esta força é mantida constante durante o período de imersão.

Após execução da abertura de fissura pretendida, os provetes foram submetidos a 10 dias de imersão em solução de 3.5% NaCl no reservatório (Figura 2), com o objetivo de acelerar o processo de corrosão das fibras de aço, simulando um ambiente marítimo. Durante o período de imersão dos provetes (10 dias), o comportamento da fibra no interior do provete foi monitorizado através de medidas electroquímicas, nomeadamente, através da realização de ensaios de potencial de circuito aberto, E_{OCP} (Figura 2). A célula electroquímica adotada foi a descrita na secção 3.2.1.

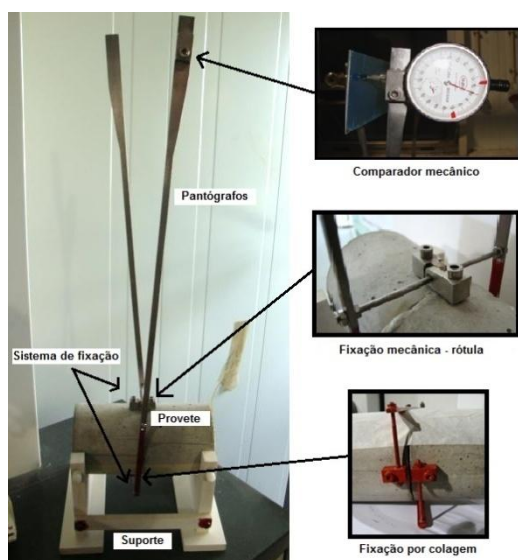


Figura 1: Sistema de suporte dos provetes e fixação dos pantógrafos



Figura 2: Imersão dos provetes fissurados sob tensão na solução

2.3.3 Ensaio de arrancamento de fibra

Finalizado o período proposto para imersão dos provetes, estes foram sujeitos ao ensaio de arrancamento das fibras. O arrancamento da fibra foi realizado por flexão sob quatro pontos de carga nos provetes. Estes ensaios foram realizados numa prensa servo-controlada de elevada precisão, sob controlo de deslocamento a meio vão, com uma velocidade de

deformação de 0.001 mm/s. A carga aplicada foi medida com recurso a uma célula de capacidade de carga de 50 kN, tendo a abertura de fissura sido lida na boca da fissura, através de um transdutor de deslocamentos posicionado perpendicularmente a esta.

A força de arrancamento na fibra, F_f , foi determinada por intermédio da seguinte expressão:

$$\frac{F_a}{2} \times b = F_f \times d \quad (1)$$

onde F_a é a força aplicada a meio vão, b é a distância do apoio do provete ao meio vão (80 mm) e d é a distância da fibra ao topo superior do provete (75.5 mm).

De modo a garantir o binário subjacente à equação (1) utilizou-se um elemento em aço na face superior do provete de modo a transmitir as forças de compressão geradas na secção. O deslizamento na fibra foi obtido com base no deslocamento lido no LVDT e tendo em conta a posição relativa entre a fibra e o eixo do LVDT, aplicando uma lei de transformação geométrica suportada no princípio que os dois corpos rígidos que formam o provete rodam em torno do ponto de contato do elemento de aço acima indicado.

3. DISCUSSÃO DE RESULTADOS

3.1 Caracterização da corrosão das fibras por ensaios electroquímicos

Nas Figuras 3 e 4 apresentam-se os resultados da evolução do E_{OCP} em função do tempo de imersão. Na Figura 3 observa-se que após 60 minutos de imersão o potencial de corrosão não estabilizou ainda, tendo sido obtidos valores, no intervalo de -563 mV a -590 mV. Na Figura 4 verifica-se que o potencial de corrosão diminuiu com o tempo de imersão, aumentando a tendência de corrosão das fibras e estabilizou após 4 dias (96 horas).

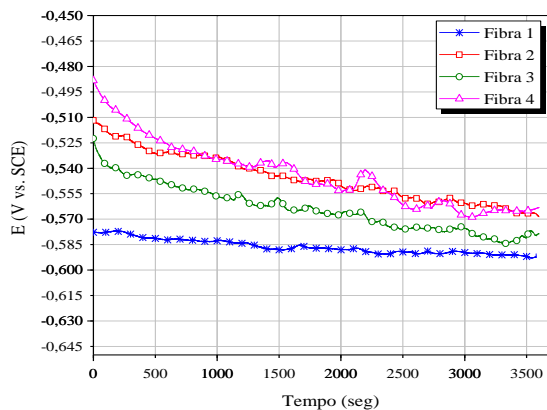


Figura 3: Evolução do E_{OCP} na fibra ao longo de 1 hora de imersão

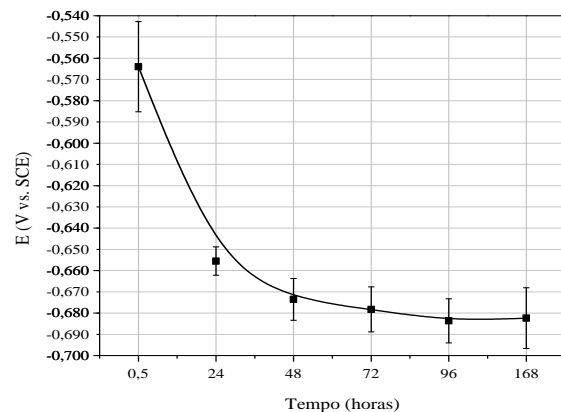


Figura 4: Evolução do E_{OCP} na fibra ao longo de 7 dias de imersão (média + desvio padrão)

De acordo com a ASTM C876 [6], os critérios de avaliação das medidas de potencial em armaduras para betão armado, baseado no eletrodo SCE, indicam que a probabilidade de corrosão é superior a 90%, no caso de o E_{corr} ser inferior a -276 mV. Admitindo-se que o mesmo pressuposto é válido para as fibras de aço, pode-se concluir que face aos resultados obtidos de E_{OCP} , inferiores a -276 mV, a probabilidade de as fibras corroerem é superior a 90%, quando imersas em solução de cloretos.

Na Figura 5 apresentam-se as curvas de polarização obtidas nos ensaios de polarização linear de uma fibra. As restantes três fibras apresentaram curvas de polarização semelhantes.

Na Tabela 2 apresentam-se os valores médios do i_{corr} e do R_p obtidos nos ensaios de polarização linear.

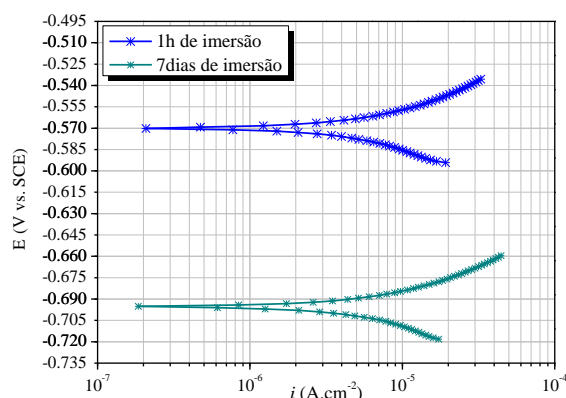


Figura 5: Curvas de polarização linear em uma fibra

Tabela 2 - Resultados obtidos nos ensaios de polarização linear

		$E_{i=0}$ (mV)	i_{corr} ($\mu\text{A}/\text{cm}^2$)	R_p ($\text{k}\Omega/\text{cm}^2$)
1 hora de imersão	Média	-566.5 ± 4.5	1.383 ± 0.123	1.588 ± 0.140
	CoV (%)	0.80	8.93	8.83
7 dias de imersão	Média	-677.5 ± 21.7	1.207 ± 0.047	1.378 ± 0.049
	CoV (%)	3.20	3.88	3.57

Para a avaliação dos resultados obtidos da densidade de corrente de corrosão, i_{corr} (velocidade de corrosão), adotando os critérios propostos por Alonso e Andrade [7] e González *et al.* [8], em que para valores maiores que $0.2 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ a corrosão é ativa, verifica-se que as fibras de aço têm um elevado risco de corrosão. Os valores da resistência à polarização, R_p , também confirmam este risco, uma vez que os resultados obtidos são bastante reduzidos. Com a técnica de polarização linear verificou-se que a variação da densidade de corrente de corrosão, i_{corr} , com o tempo de imersão, assim como a variação da resistência à polarização, R_p , foi pouco significativa.

3.2 Análise microscópica das fibras de aço

Finalizados os ensaios eletroquímicos, foi realizada uma microscopia electrónica de varrimento (MEV) de algumas fibras ensaiadas, para caracterização da estrutura superficial da corrosão nas fibras. Estas observações foram realizadas num Microscópio Electrónico de Varrimento de ultra alta resolução com emissão de campo (FEI Nova 200 (FEG/SEM); EDAX - Pegasus X4M (EDS/EBSD)), com sistema integrado de microanálise por raios-X (EDS - *energy dispersive spectrometer*) e análise de padrões de difração de eletrões retrodifundidos (EBSD - *electron backscatter diffraction*). Nas Figuras 6 apresentam-se micrografias MEV, com diferentes ampliações da visualização da superfície das fibras de aço, com e sem corrosão.

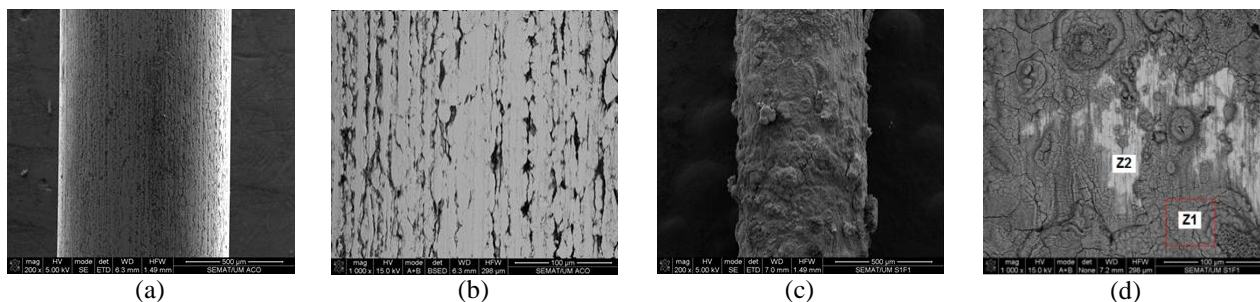


Figura 6 - Micrografias MEV da superfície das fibras de aço

(a) e (b) Sem corrosão; (c) e (d) Com corrosão

Pela micrografia da Figura 6c verifica-se que a corrosão é generalizada em toda a superfície da fibra, formando um filme homogêneo de óxidos de ferro.

Na micrografia da Figuras 6d, observa-se o contraste atômico por elétrons retrodifundidos dos elementos químicos presentes nos produtos corrosivos. Através destas micrografias, realizou-se uma análise química para identificação destes elementos. Nas zonas Z1 e Z2 (Figura 6d), os principais elementos químicos identificados foram o carbono, C, o oxigénio, O, e o Ferro, Fe. Os elementos em maior percentagem atômica foram o Ferro (41.96% em Z1 e 79.32% em Z2) e o oxigénio (49.38% em Z1). Estes elementos combinados entre si dão origem ao principal produto da corrosão observado, os óxidos ou hidróxidos de ferro (a técnica de EDS não detecta o hidrogénio), em maior concentração na zona Z1 devido à reduzida presença de oxigénio em Z2 (8.45%).

3.3 Comportamento de arrancamento de fibras corroídas

Na Figura 7 apresenta-se a variação do E_{OCP} nas fibras de aço, ao longo do período de imersão dos provetes com distintas aberturas de fissura: 0.5, 0.3, 0.1 mm e 0.0 mm. Observa-se que o potencial de corrosão diminuiu com o aumento da abertura de fissura, o que significa que quanto maior a abertura de fissura, maior a possibilidade de a fibra sofrer corrosão. Considerando o valor crítico de E_{OCP} para elevada probabilidade de corrosão proposto pela ASTM C876, verifica-se que para uma abertura de fissura menor que 0.1 mm, as fibras de aço aparentam não serem suscetíveis de sofrer corrosão. Verifica-se, também, que o desvio padrão das medições diminuiu com o aumento da abertura de fissura, provavelmente devido ao aumento da área da fibra em contacto direto com a solução. Face aos valores obtidos do desvio padrão verifica-se uma pequena diminuição dos valores de E_{OCP} até aos 3 dias de imersão, após os quais tendem a estabilizar, visto que o filme protector poderá estar formado, protegendo assim, em condições estáticas, as fibras da corrosão.

Observando o aspeto das fibras após os ensaios de arrancamento, verificou-se que a corrosão induzida aumentava com a abertura de fissura. Esta corrosão não se concentrou apenas na zona da fissura, tendo-se estendido a toda a superfície da fibra. Este facto permite concluir que nos provetes fissurados, os cloretos atingiram toda a superfície da fibra pela fissura e por absorção da solução, causando a despassivação das fibras de aço e consequente corrosão. No entanto, observou-se que nos provetes não fissurados, as fibras não foram afetadas por fenómenos de corrosão, mantendo-se passivadas no interior da matriz.

Na Figura 8 apresentam-se as curvas médias força de arrancamento versus deslizamento obtidas no arrancamento das fibras da matriz, para as distintas aberturas de fissura. Verifica-se um aumento da força de arrancamento com o aumento da abertura de fissura, que pode ser justificado pelo aumento da rugosidade que os produtos de corrosão causam nas fibras, provocando um aumento da resistência ao deslizamento da fibra.

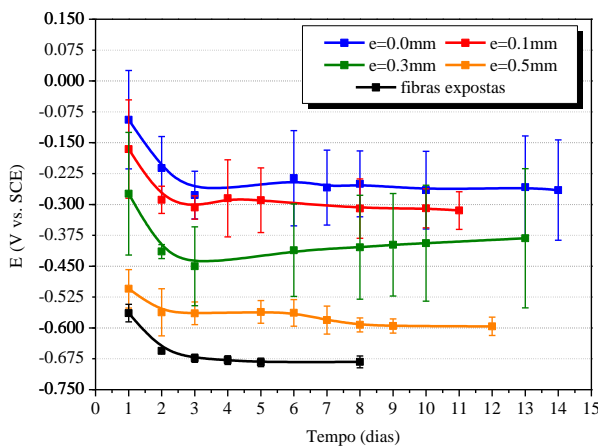


Figura 7: Variação do E_{OCP} nas fibras de aço durante o período de imersão dos provetes de BAC com distintas aberturas de fissura

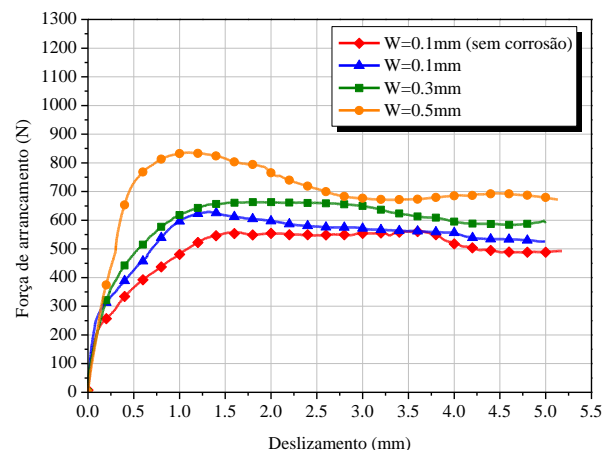


Figura 8: Curvas médias força de arrancamento versus deslizamento das fibras nos provetes de BAC com distintas aberturas de fissura

4. CONCLUSÕES

Com base nos resultados obtidos nos ensaios eletroquímicos, nas análises MEV e nos ensaios de arrancamento de fibras, poderão ser feitas as seguintes observações:

- As medições do potencial em circuito aberto, E_{OCP} , revelaram que a probabilidade de corrosão das fibras de aço numa solução de 3.5% NaCl é superior a 90%;
- Os elevados valores da densidade de corrente de corrosão, i_{corr} , e os reduzidos valores da resistência à polarização, R_p , obtidos nos ensaios de polarização linear, indicam que as fibras de aço têm um elevado risco de corrosão em ambiente com cloretos;
- As análises MEV das fibras corroídas mostraram que a corrosão foi uniforme em toda a superfície das fibras, e que os principais produtos de corrosão são óxidos de ferro;
- A susceptibilidade para a corrosão das fibras de aço que atravessam uma pseudo-fissura, aumenta com a abertura de fissura;
- A força de arrancamento das fibras de aço em BAC fissurado, após 10 dias de imersão numa solução de 3.5% NaCl, aumentou com a abertura de fissura, devido ao aumento da rugosidade que os produtos de corrosão causam nas fibras, provocando um aumento da resistência ao arranque da fibra.

5. AGRADECIMENTOS

Este trabalho foi desenvolvido no âmbito do projeto de investigação QREN, número 23024, denominado INOTEC, que envolve a empresa CiviTest e o ISISE/Universidade do Minho. O primeiro autor agradece a bolsa de investigação concedida pelo referido projeto. À Maccaferri e Radmix pelo fornecimento das fibras de aço, à Sika pelo superplastificante, à Secil pelo cimento e à Omya Comital pelo Fíler calcário.

6. REFERÊNCIAS

- [1] Balouch, S. *et al.*, *Surface Corrosion of Steel fibre reinforced concrete*, Cement and Concrete Research, 2010, V.40, pp. 410–414;
- [2] Granju, J.; Balouch, S., *Corrosion of steel fibre reinforced concrete from the cracks*, Cement and Concrete Research, 2005, V.35, pp. 573–577;
- [3] Wolyneć, S., *Técnicas Eletroquímicas em Corrosão*, Edusp - Editora da Universidade de São Paulo, 2003, São Paulo, Brasil;
- [4] D21V032, *VoltaLab systems with VoltaMaster 4*, User's Manual (English), HACH LANGE GmbH, Germany, 2013;
- [5] Frazão, C., *Durabilidade do betão auto-compactável reforçado com fibras de aço*, Dissertação de Mestrado Integrado em Engenharia Civil, Escola de Engenharia da Universidade do Minho, 2013, Guimarães, pp.202;
- [6] ASTM C876-09, *Standard Test Method for Corrosion Potentials of Uncoated Reinforcing Steel in Concrete*, ASTM International, 2009;
- [7] Alonso, C.; Andrade, C., *Effect of nitride as a corrosion inhibitor in contaminated and chloride-free carbonated mortars*, ACI Materials Journal, 1990, V.78, Nº2, pp.130-137;
- [8] González, J.; Miranda, J.; Feliu, S., *Considerations on reproducibility of potential and corrosion rate measurements in reinforced concrete*, Corrosion Science, 2004, V.46, pp.2467-2485;